

盐胁迫下 3 种海滨植物形态和生理响应特征及耐盐性差异

林雪峰¹, 顾洪涛², 虞木奎^{2*}, 陈顺伟³

(1. 浙江省台州市林业局, 浙江 台州 318000; 2. 华东沿海防护林生态系统国家定位观测研究站, 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江 杭州 311400; 3. 浙江省林业科学研究院, 浙江 杭州 310000)

摘要: [目的] 研究盐胁迫条件下 3 种海滨植物的生理生态动态响应特征及其耐盐性差异, 为盐碱地绿化树种筛选提供科学依据。[方法] 以 2 年生中山杉、小叶榕和海滨木槿幼苗为材料进行为期 56 d 的盆栽试验, 设置 3 个盐分梯度对其生长和形态、抗氧化酶系统以及渗透调节系统等指标的动态变化特征进行比较, 并通过主成分分析来明确 3 种植物在耐盐性上的差异。[结果] 短期盐胁迫 (14 d) 对 3 种植物存活率、叶形和叶色影响较小, 但长期盐胁迫 (56 d) 对小叶榕产生较大影响, 盐胁迫下 3 种植物固定枝条相对生长率动态特征差异明显。3 种植物叶片超氧化物歧化酶 (SOD) 活性随着盐处理时间增加而呈现降低趋势, 过氧化物酶 (POD) 和抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 活性先增加后降低, 丙二醛 (MDA) 含量呈现总体降低趋势。盐胁迫下 3 种植物叶片可溶性糖和可溶性蛋白含量均呈现先减少后增加的趋势, 叶片相对电导率则随着盐浓度增加而显著提高。盐处理时间和物种的交互作用对 SOD 和 POD 活性以及 MDA 含量有显著影响, 3 种植物耐盐性主成分有明显差异, 表明它们不同的耐盐响应特征。[结论] 3 种植物的生态生理响应特征表明盐处理对小叶榕影响最大, 中山杉次之, 对海滨木槿影响最小, 因此海滨木槿和中山杉有优先作为我国东部沿海地区盐碱地绿化树种的潜力。

关键词: 盐胁迫; 海滨植物; 形态; 生理; 动态响应; 耐盐差异

中图分类号: S718.43

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2018)03-0095-09

Morphological and Physiological Response and Salt-tolerance Differences of Three Coastal Plants under Salt Stress

LIN Xue-feng¹, XIE Hong-tao², YU Mu-kui², CHEN Shun-wei³

(1. Taizhou Forestry Bureau of Zhejiang Province, Taizhou 318000, Zhejiang, China;

2. National Research Station of Eastern China Coastal Forest Ecosystem, Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, Zhejiang, China; 3. Zhejiang Academy of Forestry Science, Hangzhou 310000, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] To study the dynamic physio-ecological response and salt tolerance differences of plants under salt stress to select proper greening species in saline-alkali areas. [Method] Pot experiment was conducted with 2-year-old seedlings of *Taxodium hybrid* 'Zhongshanshan', *Ficus microcarpa* and *Hibiscus hamabo*, and three salt gradients were set to compare the dynamic characteristics of seedling growth and morphology, antioxidant enzyme system and osmoregulation system, and the principal component analysis (PCA) was conducted to determine the differences of salt tolerance among the three species. [Result] Short-term salt stress (14 d) showed little influence on the survival rate, leaf shape and leaf color of the three species, but long-term salt stress (56 d) showed a signifi-

收稿日期: 2017-10-13

基金项目: 浙江省与中国林业科学研究院省院合作林业科技项目 (14204005、16204002); 浙江省台州市科技局林业推广项目 (2013A1107)

作者简介: 林雪峰 (1978—), 男, 浙江台州人, 硕士研究生, 研究方向为沿海防护林营造和管理。

* 通讯作者: 虞木奎, 研究员, 主要从事沿海防护林群落结构和生态系统功能研究。E-mail: yumukui@caf.ac.cn

cant effect on *F. microcarpa*, and the dynamic characteristics of comparative branch lengths differed obviously under salt stress. With increasing salt treatment time, leaf SOD activities of the three species showed a decreasing trend, the POD and APX activities increased at first and then decreased, and the MDA contents showed a general decreasing trend. The leaf soluble sugar and soluble protein contents of the three species decreased at first and then increased under salt stress, and the leaf comparative conductance increased significantly with the increase of salt concentration. The interaction of salt treatment time and species had significant effects on leaf SOD, POD activities and MDA contents. Principal components of salt tolerance in three species were distinct, indicating their different tolerance response characteristics. [**Conclusion**] The eco-physiological response characteristics of the three species show that the salt treatment has the greatest impact on *F. microcarpa* and less impact on *A. hybrid* and *H. hamabo*, consequently, *H. hamabo* and *A. hybrid* can be potentially prioritized as greening species in saline areas in Eastern China.

Keywords: salt stress; coastal plants; morphology; physiology; dynamic response; salt tolerance difference

土壤盐碱化是我国沿海地区土壤改良和利用所面临的重大难题,不仅影响植被的生长和演替,还影响区域整体环境质量^[1]。盐碱土溶液中含大量 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} ,而以 Na^+ 和 Cl^- 含量最高^[2]。大量的盐离子会对植物生长造成胁迫,使植物细胞内盐离子浓度升高,超出许多酶的耐受范围而导致酶的变性和失活^[3-4]。过量的盐离子渗入细胞后也会使原生质凝聚、破坏叶绿素,蛋白质的水解作用加强,造成植物体内的氨基酸积累,当这些物质积累到一定程度时,细胞就会中毒死亡^[5]。此外,盐胁迫还影响质膜的组分、透性、运输、离子流等,导致细胞膜的正常功能受损,使细胞的代谢及生理功能受到不同程度的破坏,从而影响植物的生态生理特性和正常生长^[6-7]。

正常情况下,植物本身具有特定保护机制和自我调节系统来缓解一定范围内盐胁迫对植物体的伤害,这主要包括抗氧化保护系统和渗透调节系统^[8]。抗氧化保护系统包括酶促系统和非酶促系统,涉及的物质包括:超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶和过氧化物酶(POD)、维生素C等。渗透调节物质则主要有脯氨酸和可溶性糖等,构成植物的自我调节体系,抗氧化保护系统和渗透调节系统协同作用共同调节盐胁迫对植物生理生化特性造成的影响^[9]。已有相关研究对盐胁迫环境下植物的生理响应进行了分析,包括一些主要生理生化指标,如叶片电解质渗出率、丙二醛(MDA)含量、抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性、叶绿素含量、脯氨酸含量、可溶性糖含量和POD活性等的动态变化特征^[10-11]。

中山杉(*Taxodium hybrid* 'Zhongshanshan')、小

叶榕(*Ficus microcarpa* L. f.)和海滨木槿(*Hibiscus hamabo* Sieb. et Zucc.)是我国沿海地区较为常见的海滨绿化树种,均具有较强的抗逆能力,不但耐盐碱,还具有很强的耐瘠薄和抗风能力,是较有潜力的防护和绿化树种,对其耐盐性特征和耐盐机理的研究有利于更好地发挥它们的生态功能。虽然已有研究对这几个树种的耐盐性进行了验证,但大多数仅分析了这些指标的累积变化,缺乏对动态特征的剖析,此外鲜有对这些指标之间异速变化关系的分析。因此,本试验以上述3种海滨植物为试验材料,比较不同盐分梯度下3种植物的生长、抗氧化酶和渗透调节系统等指标随盐胁迫时间增加的变化特征以及3种植物在耐盐响应特征上的差异,研究其耐盐性特征以及不同自我调节系统之间的协同变化关系,以为海滨盐碱地绿化树种的引种筛选提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料均为人工播种培育的2年生中山杉、小叶榕和海滨木槿幼苗,苗木均来源于浙江省亚热带作物研究所。分别选取各树种健康状况良好、生长势基本一致的植株用于盆栽试验。于2014年3月分别将3种幼苗栽植于塑料盆内,其中中山杉植入容积为5L的盆内,小叶榕和海滨木槿植入15L的盆内,以保证苗木根系正常生长,每盆定植1株,试验设置3个处理,每个处理10个重复,共计90盆。然后在浙江省林业科学研究院试验大棚内培育供试。栽培基质由脱盐土、沙土、泥炭土按质量比3:2:1混合而成,中山杉每盆3kg,小叶榕和海滨木槿

每盆9 kg;脱盐土于试验前准备,自然风干并过筛。每周定时加入等量完全 Hoagland 营养液,并定时清理杂草、浇水,以保证植株营养供应和正常生长。

1.2 试验方法

将所有供试苗木培养2个月后进行不同浓度的盐处理。把盐溶液配制成完全 Hoagland 营养液,其浓度分别为0 (CK)、0.3% NaCl 和 0.5% NaCl (各成分含量分别约为0、51.6、86.0 mmol·L⁻¹)。用不同浓度盐溶液把沙土浇透(5 L的盆浇溶液2 L,15 L的盆浇溶液6 L),确保沙土中盐浓度均匀。每周进行一次盐溶液处理,每周第1天称量盆的质量,2 d后再称质量,以便确定浇水量。每盆底下放置一只托盘,每次浇水时用清水清洗托盘内部,并将水倒入盆中,以防止盆土中盐量的流失,确保维持最准确的NaCl浓度。分别于处理后的第1、14、28、42和56 d测定生长量,并取样测量各项生理生化指标。

1.3 测定方法

1.3.1 植株生态形态测定 测定固定枝条生长率时,每种植株各个盐浓度处理分别选择3个固定枝条,且枝条在各种植株的相对位置基本一致以保证数据的可比性。分别在第14、28、42和56 d测量一次固定枝长长度,统计后计算植株固定枝条相对生长率 $RG = ((L_n - L_1) / L_1) / n$ (n 为测量次数)。植株高度采用米尺测量,为植物从地面到最高枝条之间的距离。同时观察并记录叶片的颜色和性状生长是否正常,统计各树种植株成活率。

1.3.2 植物生理生化指标测定 首先制备酶提取物。在冰水中加入5 mL浓度为50 mmol·L⁻¹且pH为7.0的磷酸缓冲液(PBS)(含有1 mmol·L⁻¹ EDTA-Na₂, 5% PVP, 3 mmol·L⁻¹ DTT),将0.5 g新

鲜叶片在干冰溶液中捣碎,经离心机离心,4℃下离心20 min后吸取上清液作为酶提取液。SOD活性用氮蓝四唑法测定,POD活性用愈创木酚比色法测定^[12],APX活性测定参照 Nakano 和 Asada^[13]的方法,MDA含量和可溶性糖含量参照梁军等^[14]的方法进行测定,可溶性蛋白含量用紫外吸收法测定^[15],相对电导率用浸泡法(处理12 h)测定^[16]。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 软件整理并计算数据,利用 SPSS 20.0 软件 (IBM, USA) 进行数据统计分析。同一物种不同盐浓度间的形态和生理生化指标差异用单因素方差分析进行差异显著性检验,显著性水平设置为 $\alpha = 0.05$ 。用双因素重复测量方差分析来检验树种和盐浓度对生理生化指标的影响,并用主成分分析来判别3种植物在耐盐性响应特征上的差异。

2 结果与分析

2.1 盐胁迫对植物生长和形态特征的影响

在盐胁迫下,3种植物的生长和形态特征存在差异。在短期盐胁迫(14 d)下,3种植物的成活率均为100%,到盐处理后期(56 d),中山杉和小叶榕的成活率分别下降到93.3%和83.3%,而海滨木槿的成活率仍然为100%。中山杉、小叶榕和海滨木槿在第56 d时的平均高度较第14 d分别增加了81.4%、138.6%和76.8%(表1)。中山杉和海滨木槿的叶形、叶色在整个试验过程中均保持正常,而小叶榕在盐处理后期出现了叶色部分褐变,叶形部分卷曲的变化特征。表明盐胁迫对小叶榕的影响较大,而对中山杉和海滨木槿影响较小。

表1 盐胁迫下3种植物的生长和形态特征

Table 1 Growth and morphological characteristics of three species under salt stress

树种 Species	时间 Time/d	成活率 Survival rate/%	平均高度 Mean height/cm	叶色 Leaf colour	叶形 Leaf shape
中山杉 <i>Taxodium hybrid</i> 'zhongshanshan'	14	100	39.63 ± 5.88	正常	正常
	56	93.3	71.88 ± 13.28	正常	正常
小叶榕 <i>F. microcarpa</i>	14	100	68.75 ± 6.58	正常	正常
	56	83.3	164.06 ± 15.52	部分褐变	部分卷曲
海滨木槿 <i>H. hamabo</i>	14	100	113.13 ± 3.59	正常	正常
	56	100	200.00 ± 24.49	正常	正常

注:平均高度为平均值 ± 标准偏差。

Note: Data in column of mean height are Mean ± SD.

不同浓度盐胁迫下3种植物固定枝条相对生长率不同。中山杉固定枝条相对生长率最低,最大仅

为3.67%,小叶榕在盐处理后期的固定枝条相对生长率为5.62%~89.43%,海滨木槿为34.54%~

68.65% (图1)。中山杉固定枝条相对生长率在盐浓度为0.3% NaCl时最高,在盐浓度为0.5% NaCl时最低;小叶榕固定枝条相对生长率随着盐浓度增

加而降低;而海滨木槿固定枝条相对生长率随着盐浓度增大而升高,这表明盐胁迫对3种植物的形态生长产生不同影响。

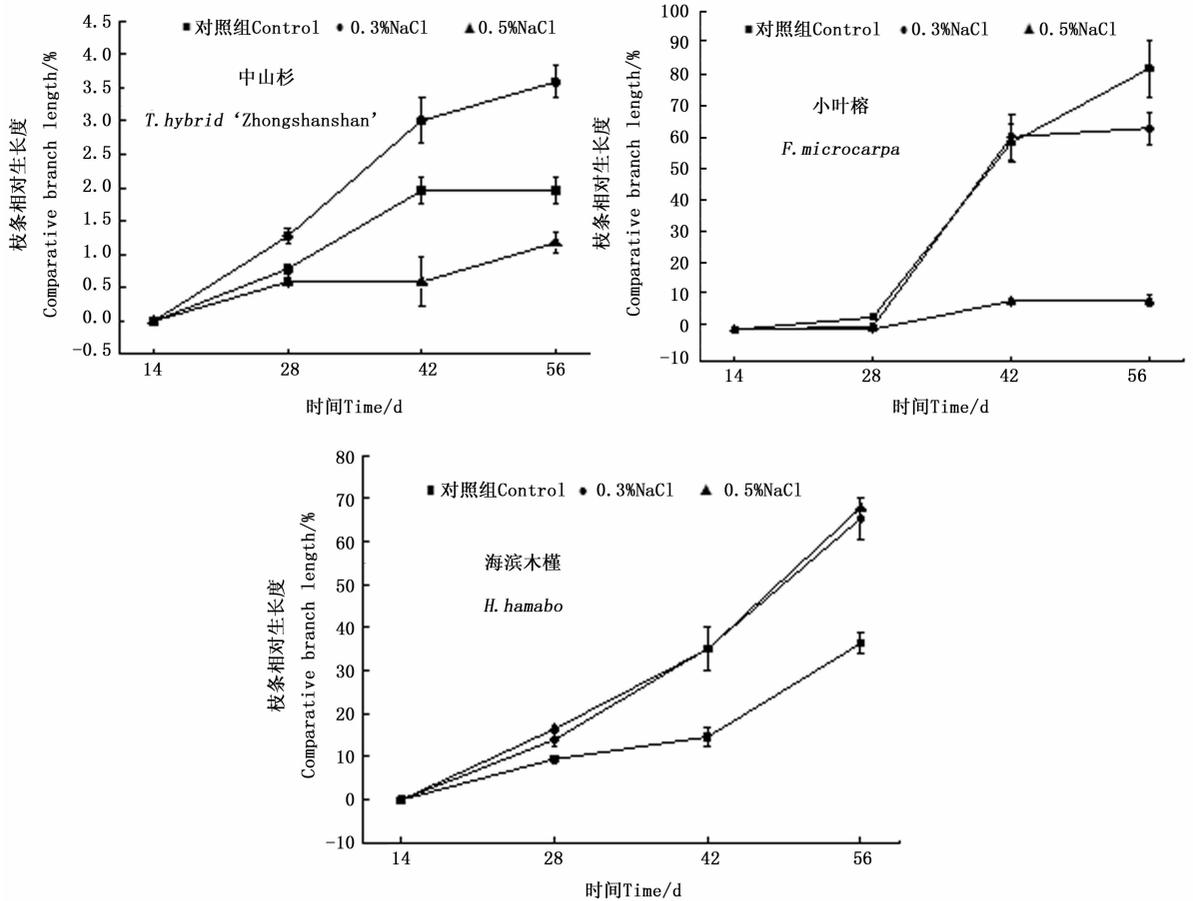


图1 不同浓度盐胁迫下3种植物固定枝条相对生长率

Fig. 1 Comparative branch lengths of three species under different concentrations of salt stress

2.2 盐胁迫对植物抗氧化酶系统和MDA含量的影响

在不同盐胁迫条件下,3种植物叶片抗氧化酶系统变化特征不同。3种植物叶片SOD活性高低关系为中山杉>小叶榕>海滨木槿,且均呈现随着盐处理时间增加而降低的趋势,其中中山杉叶片SOD活性在所有盐浓度处理下均具有明显的下降趋势,小叶榕在高盐浓度处理下于试验末期出现降低趋势,而海滨木槿的对照处理随着处理时间增加而明显下降,盐处理下先增加后出现一定程度的下降。中山杉叶片POD活性最低,且随着盐浓度和处理时间的增加变化不大,小叶榕叶片POD活性稍高于中山杉,且对照组和0.3% NaCl处理组高于0.5% NaCl处理组,POD活性在盐处理后期先增加后降低,海滨

木槿叶片POD活性最高,为小叶榕的15~50倍,盐处理下叶片POD活性先增加而后保持相对稳定。中山杉叶片APX活性在整个盐处理过程中相对稳定,未出现明显的波动,小叶榕叶片APX活性在盐处理后期先增加后减少,0.5% NaCl处理组变化幅度相对较小,海滨木槿叶片APX活性是中山杉和小叶榕的3~5倍,0.3% NaCl处理组和0.5% NaCl处理组叶片APX活性在盐处理后期明显增加,但对照组有所下降。3种植物叶片MDA含量较为接近,但随着盐处理时间增加的变化特征不同,中山杉波动不大,小叶榕先减少后增加,而海滨木槿则先减少而后保持相对稳定(图2)。3种植物抗氧化酶系统和MDA含量的动态特征表明它们具有不同的环境适应能力和自我调节特征。

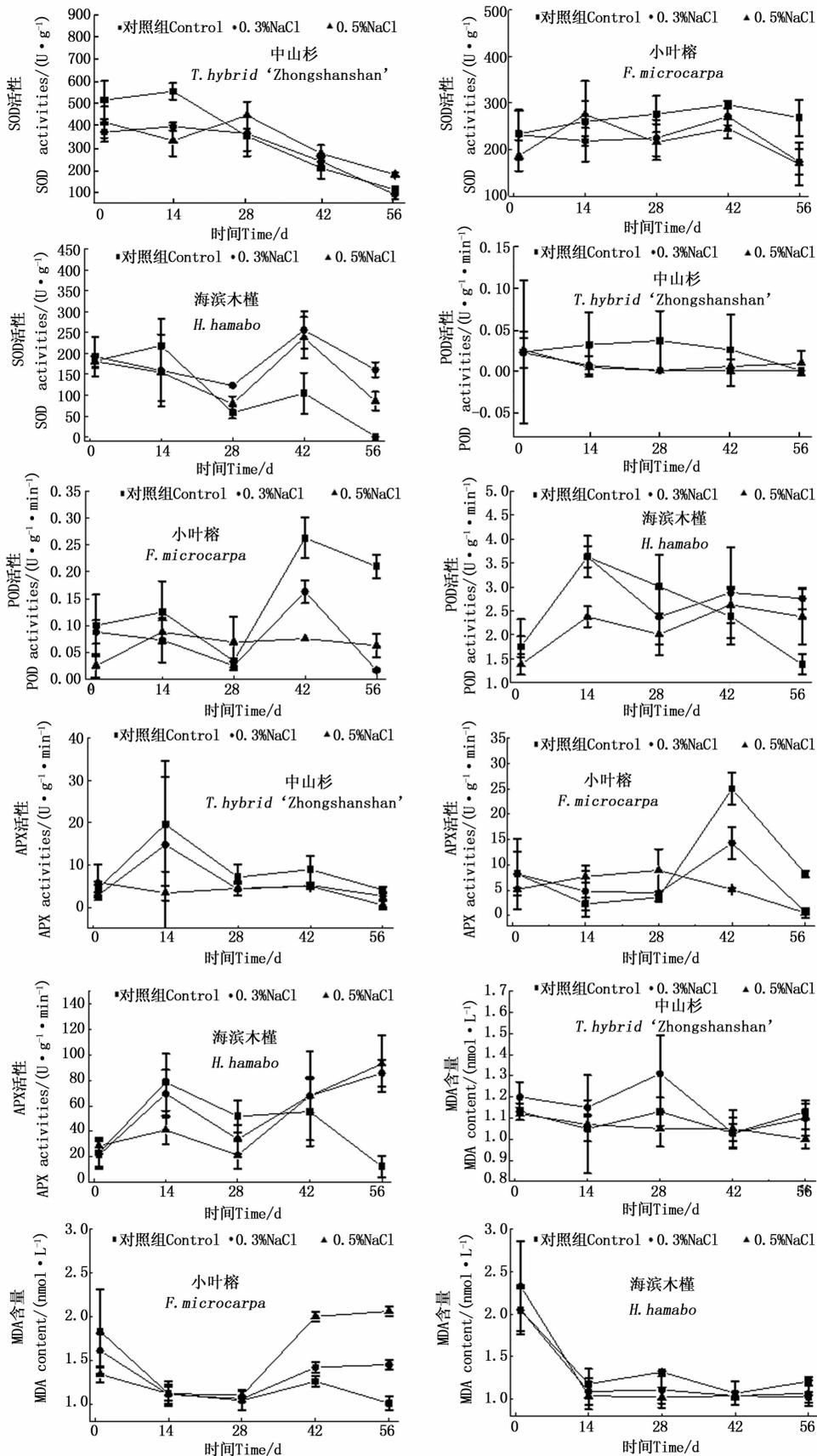


图2 不同浓度盐胁迫下3种植物叶片SOD、POD、APX活性和MDA含量

Fig. 2 Leaf activities of SOD, POD, APX and MDA contents of three species under different concentrations of salt stress

2.3 盐胁迫对植物渗透调节系统的影响

不同浓度盐胁迫对3种植物叶片可溶性糖(SS)、可溶性蛋白(SP)含量和相对电导率(CC)产生不同影响(图3)。中山杉叶片SS含量随着盐处理时间增加变化不明显,不同盐浓度之间差异性也不显著。小叶榕叶片SS含量随着盐处理时间增加有先减少后增加的趋势,而海滨木槿叶片SS含量先急剧降低而后保持稳定。3种植物叶片SP含量在不同盐浓度处理下随着时间增加而呈现较一致的变化规律,总体上均为先大幅降低而后出现小幅增长

的趋势。盐浓度的变化对中山杉叶片SP含量基本没有影响,但对小叶榕和海滨木槿产生了一定影响,表现为盐处理组叶片SP含量的变化相对缓慢。盐处理未对中山杉叶片CC产生显著影响,但0.3% NaCl处理组低于0.5% NaCl处理组和对照组。不同盐浓度对小叶榕和海滨木槿叶片CC均产生显著影响,它们的叶片CC均随着盐浓度增加而显著提高(图4)。这表明盐胁迫对3种植物渗透调节系统均产生了较大影响,而中山杉渗透调节能力稍强于小叶榕和海滨木槿。

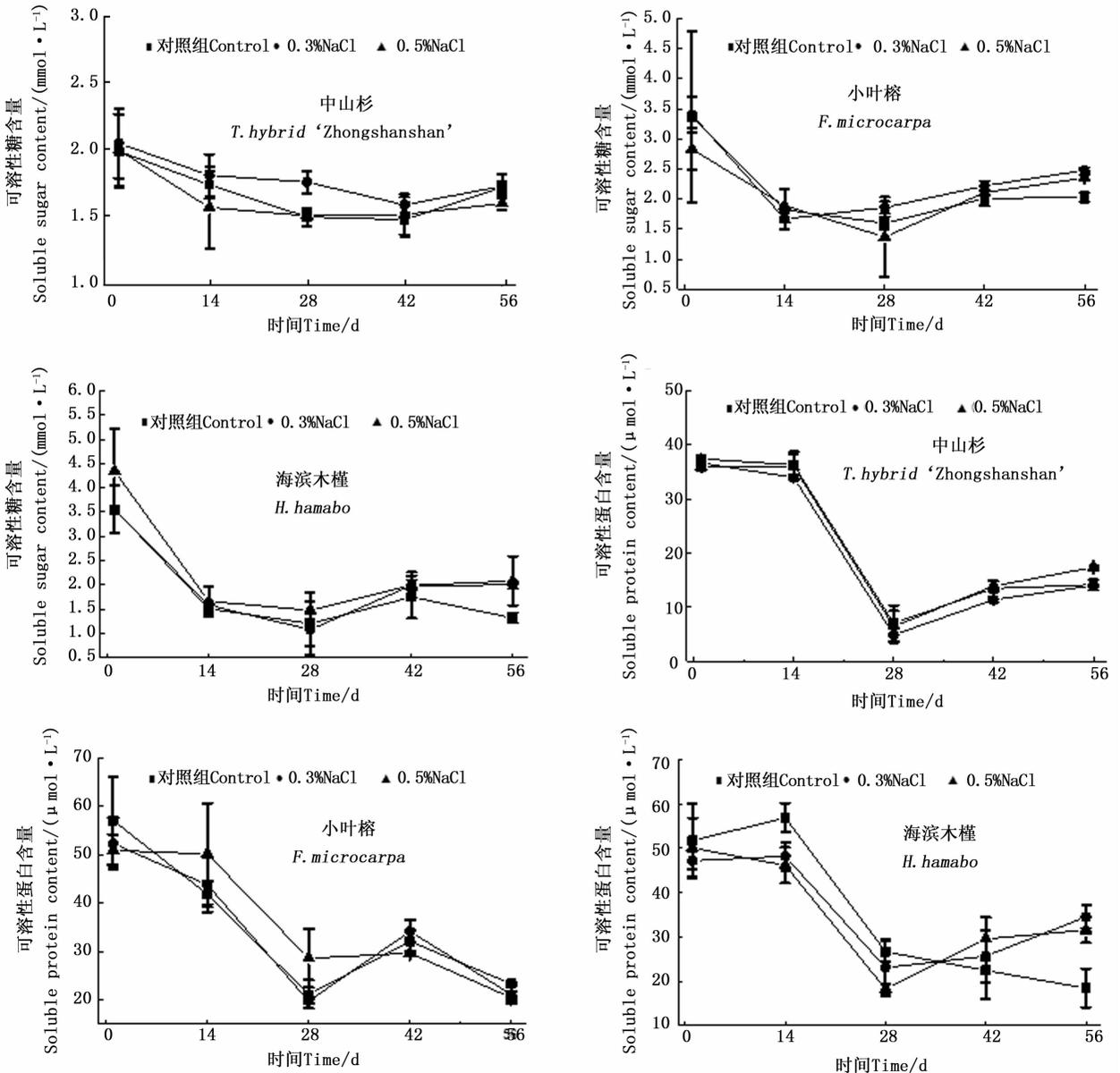
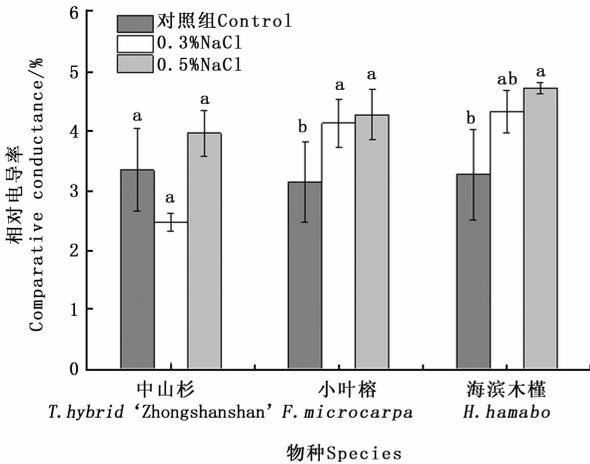


图3 不同浓度盐胁迫下3种植物叶片可溶性糖和可溶性蛋白含量

Fig. 3 Leaf soluble sugar and soluble protein contents of three species under different concentrations of salt stress



注:图中误差棒为平均值的标准误差,同一物种不同小写字母表示不同盐处理之间差异显著($P < 0.05$)。

Note: Vertical bars indicate standard error of the mean. Different lower-case letters indicate significant between different treats in same species ($P < 0.05$).

图4 不同浓度盐胁迫下3种植物叶片的相对电导率

Fig.4 Leaf comparative conductance of three species under different concentrations of salt stress.

2.4 3种植物对盐胁迫的生理响应差异

3种植物的双因素重复测量方差分析表明:盐处理时间对叶片SOD、POD、APX、MDA、可溶性糖(SS)、可溶性蛋白(SP)均有显著影响,物种对以上6种指标的影响相对较小,盐处理时间和物种的交互作用对SOD、POD活性和MDA的含量有显著影响(表2)。分别对3种植物叶片生理生化指标进行主成分分析,结果表明:3种植物对盐胁迫的响应特征不同。中山杉、小叶榕和海滨木槿前两个主成分的累计贡献率分别为72.824%、64.319%和71.435%,但第1主成分组成有明显差异。中山杉的第1主成分主要是SOD和可溶性蛋白,小叶榕的第1主成分主要包括POD、APX和SOD,而海滨木槿的第1主成分则主要为APX、POD和可溶性糖(表3)。

3 讨论

本研究表明中山杉、小叶榕和海滨木槿3种试验树种对盐胁迫的耐受性存在明显差异,结合其形态和生理生化指标的动态变化特征可以判断:海滨

表2 3种植物耐盐性的双因素重复测量方差分析

Table 2 Two-way repeated measures AVONA in three species

因子 Factor	自由度 DF	SOD	POD	APX	MDA	SS	SP
时间 Time	4	51.30 **	428.53 **	9.29 *	76.98 **	29.21 **	5 222.25 **
物种 Species	2	18.734 **	0.001	0.003	0.225	0.170	0.619 *
时间 × 物种 Time × Species	8	3.407 *	2.384 **	3.380	2.766 *	2.339	1.348

注: ** 表示极显著差异 ($P < 0.01$), * 表示显著差异 ($P < 0.05$)。

Note: ** indicates significant level at $P < 0.01$, * indicates significant level at $P < 0.05$.

表3 不同浓度盐胁迫下3种植物叶片生理指标的主成分分析

Table 3 Principal component analysis of physiological indexes of three species under different concentrations of salt stress

树种 Species	主成分 Principal component	SOD						特征值 Eigenvalue		贡献率 Contribution rate/%
		SOD	POD	APX	MDA	SS	SP			
中山杉 <i>T. hybrid 'Zhongshanshan'</i>	1	0.809	0.718	0.717	0.067	0.263	0.764	2.340	39.008	
	2	-0.210	-0.267	-0.180	0.956	0.956	0.229	2.028	33.807	
小叶榕 <i>F. microcarpa</i>	1	0.763	0.923	0.827	0.019	0.159	0.484	2.380	39.663	
	2	-0.111	-0.223	-0.251	-0.172	0.873	0.750	1.480	24.671	
海滨木槿 <i>H. hamabo</i>	1	0.426	0.727	0.805	-0.741	0.758	0.181	2.513	41.886	
	2	0.692	0.319	0.191	0.524	0.563	0.743	1.760	29.325	

木槿耐盐性最强,中山杉次之,而小叶榕的耐盐性最差。已有研究表明,植物在盐胁迫下叶片膜脂结构会被改变^[17]。脂质过氧化程度与细胞内活性氧的水平有关,当活性氧积累超过抗氧化系统的清除能力时,就会造成抗氧化酶活性的降低和膜透性的增加,例如活性氧能够直接氧化细胞中的游离蛋白,可使细胞中的大分子物质,像膜脂、蛋白和核酸等物

质解体而丧失它们的功能^[18-19]。植物叶片中SOD、POD和APX在维持细胞内活性氧平衡方面具有重要作用^[20]。在逆境胁迫条件下,SOD、POD和APX活性的变化可以反映细胞清除活性氧的能力,其中SOD和APX一起被认为是抗氧化系统中较重要的酶,能直接清除 H_2O_2 和 $O_2^{-[21]}$ 。此外,盐胁迫下植物抗氧化酶的活性下降,MDA含量迅速积累,会导

致质膜透性增加^[22]。在本试验中,用 0.5% NaCl 处理小叶榕 14 d 后,其叶片 SOD 活性明显下降,表明其清除 O₂⁻ 的能力下降。同时,盐处理下小叶榕叶片的 POD 和 APX 活性在处理前 42 d 与对照组没有显著差异,但之后便显著低于对照组,而叶片中 MDA 含量从 42 d 开始显著高于对照组,这是由于盐处理组 SOD、POD 和 APX 活性下降使得超氧阴离子自由基(O₂⁻) 积累,不能将 H₂O₂ 分解成水,致使 H₂O₂ 和 O₂⁻ 通过 Haber-Weiss 反应生成毒性更强的 ·OH 损伤了自身细胞。盐胁迫后第 56 d,小叶榕叶片 MDA 含量和细胞膜相对电导率均大幅增加,说明膜脂过氧化程度和电解质外渗率增加,细胞膜的完整性遭到了一定程度的破坏。海滨木槿和中山杉在盐胁迫下植株叶片 SOD、POD 和 APX 活性的变化趋势与对照组较为接近,MDA 含量和相对电导率与对照组差异较小,从而能够保持较高的细胞膜透性。在长期盐处理条件下,海滨木槿和中山杉能通过抗氧化酶系统及时清除活性氧而保持细胞内活性氧的平衡,避免对质膜的过氧化损伤。

植物在盐胁迫下,渗透调节保护物质如 SS、有机酸和 SP 也会增加^[23]。在本试验中,耐盐性最强的海滨木槿在高浓度盐处理后叶片 SS 和 SP 含量在第 56 d 时均显著高于对照组,而耐盐性较差的小叶榕在高浓度盐处理后叶片 SP 含量低于对照组,盐处理组的叶片 SS 含量虽然高于对照组(0.3% NaCl 处理组和 0.5% NaCl 处理组分别比对照组高 22.2% 和 15.8%),但海滨木槿叶片 SS 增加幅度更大(0.3% NaCl 处理组和 0.5% NaCl 处理组分别比对照组高 51.5% 和 57.6%)。植物叶片生理生化指标的变化最终反映在植物生长和形态指标上表现为海滨木槿存活率为 100%,且叶形叶色在整个试验周期中保持正常,而小叶榕的存活率在试验后期已经下降到 83.3%,叶形和叶色也出现了不正常的变化,证明了 3 种植物耐盐性的明显差异。

虽然目前已在较多树种上进行了耐盐性试验,但盐胁迫减慢或损伤植物组织的机制仍然不明确^[24-25]。本研究不仅从部分形态和生理生化指标进行了比较研究,还对 3 种植物耐盐性机理的差异进行了初步探索。双因素重复测量方差分析表明盐处理时间对叶片 6 种生化指标均有显著影响,物种的影响相对较小,盐处理时间和物种的交互作用对 SOD、POD 活性和 MDA 含量有显著影响。通过主成分分析可知,对中山杉耐盐性影响最大的是 SOD 活

性和 SP 含量,对小叶榕影响最大的是 POD、APX 和 SOD 活性,而海滨木槿耐盐性则主要受 APX、POD 活性和 SS 影响。这表明 3 种植物的耐盐性响应特征有所不同,但都受到 SOD 活性的影响,说明 SOD 可能是植物叶片抗氧化系统中起关键作用的酶。本研究仅从植物叶片抗氧化酶和渗透调节系统对 3 种植物进行了耐盐性比较,但仍需从细胞结构完整性方面^[26] 进一步研究其耐盐机制的差异以及对盐处理时间和盐浓度的综合响应特征。

4 结 论

盐胁迫条件下,中山杉、小叶榕和海滨木槿 3 种植物的生长形态和生理生化指标动态特征存在差异,综合来看小叶榕耐盐性最差,中山杉较强,而海滨木槿耐盐性最强。因为在盐胁迫下小叶榕叶片抗氧化酶和渗透调节系统受到影响,及时清除自由基的能力下降,改变了细胞膜透性而对植物细胞功能造成伤害,导致小叶榕耐盐性较差,而海滨木槿则拥有较强的调节和适应能力。3 种植物的耐盐性响应特征有所差异,但均受到叶片 SOD 含量的强烈影响。因此从耐盐性来看,可将海滨木槿作为盐碱地绿化的优良树种,这对沿海地区的绿化建设和环境改善具有重要的意义。

参 考 文 献:

- [1] 张晓光,黄 标,梁正伟,等. 松嫩平原西部土壤盐碱化特征研究 [J]. 土壤, 2013, 45(2): 332-338.
- [2] Zhou L J, Creech D L, Krauss K W, et al. Can we improve the salinity tolerance of genotypes of *Taxodium* by using varietal and hybrid crosses? [J]. HortScience, 2010, 45(12): 1773-1778.
- [3] 陈 涛,王贵美,沈伟伟,等. 盐胁迫对红麻幼苗生长及抗氧化酶活性的影响 [J]. 植物科学学报, 2011, 29(4): 493-501.
- [4] Marcum K B, Anderson S J, Engelke M C. Salt gland ion secretion: a salinity tolerance mechanism among five zoysiagrass species [J]. Crop Science, 1998, 38(3): 806-810.
- [5] Ligaba A, Katsuhara M. Insights into the salt tolerance mechanism in barley (*Hordeum vulgare*) from comparisons of cultivars that differ in salt sensitivity [J]. Journal of Plant Research, 2010, 123(1): 105-118.
- [6] Muchate N S, Nikalje G C, Rajurkar N S, et al. Plant salt stress; adaptive responses, tolerance mechanism and bioengineering for salt tolerance [J]. Botanical Review, 2016, 82(4): 371-406.
- [7] 杨少辉,季 静,王 罡,等. 盐胁迫对植物影响的研究进展 [J]. 分子植物育种, 2006, 4(3S): 139-142.
- [8] Conner W H, Inabinette L W. Identification of salt tolerant baldcypress (*Taxodium distichum* (L.) Rich) for planting in coastal areas [J]. New Forests, 2005, 29(3): 305-312.

- [9] 高武军,于美玲,邓传良,等. NaCl胁迫对6种红花幼苗渗透调节物质及抗氧化系统的影响[J]. 植物科学学报, 2010, 28(5): 612-617.
- [10] 张玉鑫,康恩祥,马凌之,等. NaCl胁迫对甜瓜幼苗叶片膜过氧化和渗透调节物质的影响[J]. 果树学报, 2007, 24(2): 194-198.
- [11] 鲁艳,雷加强,曾凡江,等. NaCl处理对梭梭生长及生理生态特征的影响[J]. 草业学报, 2014, 23(3): 152-159.
- [12] 张涛,安黎哲,陈拓,等. 不同海拔青海云杉与祁连圆柏叶片抗氧化系统[J]. 植物生态学报, 2009, 33(4): 802-811.
- [13] Nakano Y, Asada K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts [J]. *Plant & Cell Physiology*, 1981, 22(5): 867-880.
- [14] 梁军,王媛,贾秀贞,等. 溃疡病菌对杨树愈伤组织细胞膜透性、可溶性糖及MDA含量的影响[J]. 林业科学, 2008, 44(8): 72-77.
- [15] 李西,王丽华,刘尉,等. 三种暖季型草坪草对二氧化硫抗性的比较[J]. 生态学报, 2014, 205(5): 1189-1197.
- [16] Jiang Y, Huang B. Protein alterations in tall fescue in response to drought stress and abscisic acid [J]. *Crop Science*, 2002, 42(1): 202-207.
- [17] 蔺海明,张有福,贾恢先,等. 盐分胁迫下不同年龄枸杞枝条着生叶片生理特征的研究[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(5): 112-114.
- [18] Li J, Liao J, Guan M, *et al.* Salt tolerance of *Hibiscus hamabo*, seedlings: a candidate halophyte for reclamation areas [J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2012, 34(5): 1747-1755.
- [19] 李文巧,徐根娣,吴玉环,等. 水分胁迫对长序榆幼苗脂质过氧化及抗氧化系统的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 261-266.
- [20] Sofu A, Dichio B, Xiloyannis C, *et al.* Effects of different irradiance levels on some antioxidant enzymes and on malondialdehyde content during rewetting in olive tree [J]. *Plant Science*, 2004, 166(2): 293-302.
- [21] Kong J, Dong Y, Xu L, *et al.* Role of exogenous nitric oxide in alleviating iron deficiency-induced peanut chlorosis on calcareous soil [J]. *Journal of Plant Interactions*, 2014, 9(1): 450-459.
- [22] Ashraf M A, Ashraf M, Shahbaz M. Growth stage-based modulation in antioxidant defense system and proline accumulation in two hexaploid wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars differing in salinity tolerance [J]. *Flora*, 2012, 207(5): 388-397.
- [23] 杨升,张华新,刘涛. 盐胁迫对16种幼苗渗透调节物质的影响[J]. 林业科学研究, 2012, 25(3): 269-277.
- [24] 纳晓莹,王秀伟,徐浩玉,等. 4种桦树幼苗耐盐性分析与评价[J]. 植物研究, 2015, 35(6): 873-882.
- [25] 张华新,宋丹,刘正祥. 盐胁迫下11个树种生理特性及其耐盐性研究[J]. 林业科学研究, 2008, 21(2): 168-175.
- [26] Yang G, Zhou R, Tang T, *et al.* Gene expression profiles in response to salt stress in *Hibiscus Tiliaceus* [J]. *Plant Molecular Biology Reporter*, 2011, 29(3): 609-617.

(责任编辑:金立新)